

⑨ 日本国特許庁(JP)

⑩ 特許出願公開

⑪ 公開特許公報(A)

平3-101419

⑫ Int. Cl.<sup>3</sup>

H 03 L 7/26  
// H 01 S 1/00

識別記号

庁内整理番号

8731-5J  
7630-5F

⑬ 公開 平成3年(1991)4月26日

審査請求 未請求 請求項の数 1 (全6頁)

⑭ 発明の名称 光トラップ方式原子発振器

⑮ 特 願 平1-237129

⑯ 出 願 平1(1989)9月14日

⑰ 発 明 者 久 留 賢 治

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本電信電話株式会社内

⑱ 発 明 者 木 原 雅 巳

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本電信電話株式会社内

⑲ 出 願 人 日本電信電話株式会社

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号

⑳ 代 理 人 弁理士 谷 義 一

# 明 細 書

## 1. 発明の名称

光トラップ方式原子発振器

## 2. 特許請求の範囲

1) 原子ビームを発生させるための原子ビーム炉と、

前記原子ビームを冷却するための冷却用レーザと、

前記原子ビームを単一エネルギー状態にするためのポンプ用レーザと、

冷却された前記原子ビームをトラップするためのトラップ用レーザと、

周波数可変電磁波発生手段と、

前記周波数可変電磁波発生手段で発生させた電磁波による前記原子ビームにおける共鳴遷移を検出するための共鳴検出手段と、

前記周波数可変電磁波発生手段の周波数を制御するための周波数制御手段とを備え、

前記原子ビーム発生炉で発生させた原子

ビームに前記冷却用レーザと前記ポンプ用レーザからの出力光を照射して、原子ビームの冷却及び単一エネルギー状態化を行った後、前記トラップ用レーザの出力光で原子ビームをトラップし、前記周波数可変電磁波発生手段で発生させた電磁波の周波数を所定の周波数シフト量だけシフトさせてトラップされた原子ビームに照射し、前記電磁波によって誘起された原子ビームの共鳴遷移を前記共鳴検出手段によって検出した第1の共鳴出力と、

前記原子ビーム発生炉で発生させた原子ビームに前記冷却用レーザと前記ポンプ用レーザからの出力光を照射して、原子ビームの冷却及び単一エネルギー状態化を行った後、前記トラップ用レーザの出力光で原子ビームをトラップし、前記周波数可変電磁波発生手段で発生させた電磁波の周波数を所定の周波数シフト量だけ反対側にシフトさせてトラップされた原子ビームに照射し、前記電磁

波によって誘起された原子ビームの共鳴遷移を前記共鳴検出手段によって検出した第2の共鳴出力との差が小さくなるように、前記周波数可変電磁波発生手段の周波数が前記周波数制御手段によって制御されることを特徴とする光トラップ方式原子発振器。

(以下余白)

### 3. 発明の詳細な説明

(産業上の利用分野)

本発明は、小型でかつ周波数精度の優れた原子発振器に関するものである。

(従来の技術)

一般に発振器の周波数短期安定度は、共鳴のQとSN比によって決定される。従来の受動型原子発振器の場合、Qを大きくする(即ち、共鳴線幅を狭くする)ために、以下の2種類の方法が用いられている。

従来のセシウム原子発振器の場合、セシウム原子ビームに垂直にマイクロ波を照射して、ドブラ広がり線幅を除去している。この場合の共鳴線幅は、セシウム原子-マイクロ波相互作用時間の逆数に反比例する。従って、相互作用領域を空間的に分離し、その間の干渉を利用することにより共鳴線幅を狭くしている(ラムゼイ共鳴法)。この方法の欠点は、相互作用領域間のマイクロ波位相差により共鳴周波数がシフトすることである。突

隙の狭さでは、原子ビームの方向を反転させることによりシフトを補正しているが、その補正精度が周波数精度を決定する主要要因になっている。

一方、従来のルビジウム原子発振器の場合、ルビジウム原子蒸気を封入した密閉容器に緩衝ガスを加入、ルビジウム原子と緩衝ガス分子との衝突によりルビジウム原子のドリフト速度を小さくしている。これにより、ドブラ広がり線幅や衝突広がり線幅を狭くすることができる。この方法の欠点は、ルビジウム原子と緩衝ガス分子の衝突により、共鳴周波数がシフトすることである。このシフト量は緩衝ガスの圧力によって変動し、周波数精度劣化要因となっている。

これらの方法に対し、双曲面状の静電ポテンシャル中にイオンをトラップする方法が提案されている。実際には、静電界だけでは閉じ込めは不可能であるので、同時に静電界または高周波電界を印加する。この方法では、イオン-マイクロ波相互作用時間を長くすることができるので、共鳴

線幅を非常に狭くすることができる。また、緩衝ガスや密閉容器を用いないので、衝突による周波数シフトも存在しない。しかし、イオンの温度が高いため2次ドブラ効果による周波数シフトが非常に大きいという欠点がある。この問題はレーザー冷却の技術によって解決することが出来る。このレーザー冷却の原理を簡単に説明する。イオンの共鳴周波数を $\nu$ 、トラップ内の調和振動周波数を $F$ とする時、トラップされたイオンに周波数 $\nu - F$ のレーザー光を照射すると、イオンはレーザー光を吸収して励起された後、周波数 $\nu$ の蛍光を放出し、 $h\nu$ の運動エネルギーを失う( $h$ はプランク定数)。この過程を繰り返すことにより、イオンは冷却される。この方法の実用上の欠点は、冷却用レーザーの問題であると考えられる。現在有望視されている主なイオンとその共鳴波長、光源は以下の通りである。

イオン	共振波長	光源
バリウムイオン	493nm	色素レーザ
イットリウムイオン	389nm	色素レーザ
	+ 2 次高調波	
水銀イオン	194nm	色素レーザ
	+ 2 次高調波	
	+ 和周波数混合	

このように、少なくとも周波数安定化された色素レーザ（及びその励起用光源）が必要であり、さらには波長変換用の光非線形素子（高調波発生器、周波数混合器）が必要となることが多い。従って、この方法で装置の小型化・経済化を行うことは非常に困難であると予想される。

（発明が解決しようとする課題）

このように、従来の原子発振器は周波数精度が劣り、また装置が大型化するという欠点があった。

本発明は、レーザ光によって光トラップされた

周波数を所定の周波数シフト量だけシフトさせてトラップされた原子ビームに照射し、前記電磁波によって誘起された原子ビームの共鳴遷移を前記共鳴検出手段によって検出した第1の共鳴出力と、前記原子ビーム発生炉で発生させた原子ビームに前記冷却用レーザと前記ポンプ用レーザからの出力光を照射して原子ビームの冷却及び単一エネルギー状態化を行った後、前記トラップ用レーザの出力光で原子ビームをトラップし、前記周波数可変電磁波発生手段で発生させた電磁波の周波数を所定の周波数シフト量だけ反対側にシフトさせてトラップされた原子ビームに照射し、前記電磁波によって誘起された原子ビームの共鳴遷移を前記共鳴検出手段によって検出した第2の共鳴出力との差が小さくなるように前記周波数可変電磁波発生手段の周波数を前記周波数制御手段によって制御されることを特徴とする光トラップ方式原子発振器。

（作 用）

原子を用いることにより、周波数精度の優れた小型原子発振器を実現することを目的とする。

（課題を解決するための手段）

本発明は原子ビームを発生させるための原子ビーム炉と、前記原子ビームを冷却するための冷却用レーザと、前記原子ビームを単一エネルギー状態にするためのポンプ用レーザと、冷却された前記原子ビームをトラップするためのトラップ用レーザと、周波数可変電磁波発生手段と、前記周波数可変電磁波発生手段で発生させた電磁波による前記原子ビームにおける共鳴遷移を検出するための共鳴検出手段と、前記周波数可変電磁波発生手段の周波数を制御するための周波数制御手段とを備え、前記原子ビーム発生炉で発生させた原子ビームに前記冷却用レーザと前記ポンプ用レーザからの出力光を照射して原子ビームの冷却及び単一エネルギー状態化を行った後、前記トラップ用レーザの出力光で原子ビームをトラップし、前記周波数可変電磁波発生手段で発生させた電磁波の

静電ポテンシャルによるトラップは荷電粒子にしか適用できないが、レーザ光による光トラップは中性原子にも適用することができる。この光トラップは2段階からなる。第1段階は原子ビームの低速化である。原子ビームの進行方向と反対側から、原子の共鳴周波数 $\nu$ より $\delta\nu$ だけ低周波側にシフトさせたレーザ光を照射する。この時、 $v = c\delta\nu/\nu$  ( $c$  は光速) なる速度を有する原子は、レーザ光を吸収して励起された後、周波数 $\nu$ の蛍光を放出し、 $h\delta\nu$ の運動エネルギーを失う。運動エネルギーを失って低速化された原子はレーザ光に共鳴しなくなるため、このままでは十分な低速化はできない。このため、印加磁界による共鳴周波数の同調、またはレーザ光の周波数の同調を行う。

これらの方法により十分低速化された原子は次に放射圧または双極子力によってトラップされる。放射圧トラップの場合、X、Y、Zの3軸方向のレーザ光定在波が交差する領域でトラップが行われる。レーザ光の周波数は原子の共鳴周波数

より線幅の半分程度低周波側にずらす。この領域において、原子は全方向からの放射圧によって冷却され、トラップされる。双極子力トラップの場合は、通常ガウスビーム状のレーザ光の焦点付近においてトラップが行われる。レーザ光の周波数は原子の共鳴周波数からかなり低周波側にずらす。この時、レーザ光によって励起された電気双極子は電界と同相なので、電界強度の大きいほうに向かって力が作用し、原子はトラップされる。

近年、米国の宇宙物理共同研究所で、半導体レーザを用いたセシウム原子の放射圧トラップが実現されている。冷却された原子の温度は125  $\mu$ K程度で、共鳴線幅として44MHzが得られている(D. Sesko, C. G. Fan, and C. E. Wieman, "Production of a cold atomic vapor using diode-laser cooling", J. Opt. Soc. Am. B, 5, 6, pp. 1225-1227, 1988 及び D. Sesko and C. E. Wieman, "Observation of the caesium clock transition in laser-cooled atoms", Opt. 1989, 14, 5, pp. 263-271, 1989)。これを用いて原子発振器を構成することが本発明の特徴である。

原子ビーム炉1でセシウムを気化し、ビームにして真空中に放出する。この原子ビームにポンプ用半導体レーザ5の出力光を照射する。この光の周波数は $6S_{1/2}F=3-6P_{3/2}F=3$ の遷移に同調してある。これによって原子はポンピングされ、 $6S_{1/2}F=4$ の単一エネルギー状態になる。さらに、この原子ビームに冷却用半導体レーザ4の出力光を照射する。この光の周波数は $6S_{1/2}F=4-6P_{3/2}F=5$ の遷移に同調してある。原子の共鳴周波数を同調するため、テーバ状のソレノイド2により磁界を印加しておく。トラップ用半導体レーザ6の出力光は光カブラ11で分岐され、反射鏡15, 16によって3軸方向の定在波を形成する(図1では、紙面に垂直な方向の定在波は省略してある)。この光の周波数は、 $6S_{1/2}F=4-6P_{3/2}F=5$ の遷移の共鳴周波数より2.5MHz(自然線幅の約半分)低くしておく。冷却・単一エネルギー状態化された原子ビームは定在波の交差領域において、自然線幅限界の温度でトラップされ

る。これを用いて原子発振器を構成することが本発明の特徴である。この光トラップ方式原子発振器を従来の原子発振器と比較すると、以下のような利点を有する。

- ・ラムゼイ共鳴法や縦衝ガスをを用いずに狭い共鳴線幅が得られるので、周波数精度が優れている。
- ・2次ドブラ効果が非常に小さいので、周波数精度が優れている。
- ・半導体レーザが使用できるので装置の小型化・経済化の可能である。

#### (実施例)

第1図に本発明の実施例を示す。本実施例は原子ビームとしてセシウム原子ビームを、冷却用レーザ、ポンプ用レーザ、トラップ用レーザとして波長852nmで発振する半導体レーザを、周波数可変電磁波発生手段として周波数可変ルビジウム原子発振器とシンセサイザを、光トラップ方式としては、放射圧トラップを用いた実施例である。

る。

トラップ中の原子のエネルギー準位はレーザ光の摂動を受けてシフトする。従って、マイクロ波を照射する際には、レーザ光を光スイッチ7~9によって遮断する必要がある。この時に、冷却されていない原子が相互作用領域に入ってくるのを阻止するために、原子ビームもシャッタ3で遮断する。この状態で、マイクロ波放射器17によって、マイクロ波を照射する。このマイクロ波は周波数可変ルビジウム原子発振器21の出力(周波数 $\nu$ 。)をシンセサイザ21でM倍して $+8\nu$ だけシフトさせたものである。その後、再び冷却用半導体レーザ4の出力光を照射すると、マイクロ波共鳴遷移をしなかった原子だけが蛍光を放出する。この蛍光をフォトダイオード19(共鳴検出手段)で電気信号に変換した値(第1の共鳴出力)を必要に応じて、前置増幅器20で増幅してメモリ22に記憶する。次にもう一度、原子ビームをトラップした、周波数 $M\nu.-8\nu$ のマイクロ波と冷却用半導体レーザ4の出力光とを照射し、蛍光をフ

フォトダイオード19で電気信号に変換した値(第2の共振出力)を必要に応じて前置増幅器20で増幅してメモリ22に記憶する。メモリ22とメモリ23の切り替えは、切替器21で行う。差分増幅器24と積分増幅器25を用いて、メモリ22の値とメモリ23の値の差分が0になるように周波数可変ルビジウム原子発振器の周波数を制御することにより、発振器出力は、セシウム原子の基準周波数 $9.1926317706\text{Hz}$ の1/Mに安定化される。なお、切替器21〜積分増幅器25が周波数制御手段である。

これらの動作はタイミング発生器28によって第1表のようにコントロールされる。

スチラップ	シャッタ	光スイッチ	切替器	シンセサイザ	冷却・ポンピング・トラップ		マイクログ波相互作用		冷却・ポンピング・トラップ		マイクログ波相互作用	
					冷却	ポンピング	冷却	ポンピング	冷却	ポンピング	冷却	ポンピング
1	open	on	on	off	on	off	on	off	on	off	on	off
2	close	off	off	off	on	off	on	off	on	off	on	off
3	close	on	off	off	on	off	on	off	on	off	on	off
4	open	on	on	off	on	off	on	off	on	off	on	off
5	close	off	off	off	on	off	on	off	on	off	on	off
6	close	on	off	off	on	off	on	off	on	off	on	off
7	1に返る											

なお原子ビームとしてルビジウム原子ビームを用い、冷却用レーザ、ポンプ用レーザ、トラップ用レーザのうち、少なくとも1つを波長780nmで発振する半導体レーザを用いることも可能である。さらに、周波数可変電磁波発生手段として周波数可変ルビジウム原子発振器のみを用いること、周波数可変セシウム原子発振器あるいは周波数可変セシウム原子発振器とシンセサイザとを用いること、電圧制御水晶発振器あるいは電圧制御水晶発振器とシンセサイザとを用いること、さらに周波数可変超伝導空間安定化発振器を用いることも可能である。

#### (発明の効果)

以上説明したように、本発明による原子発振器は小型でかつ周波数精度が優れている。本発明は、デジタル通信網や、各種の電波測位システムに利用することができる。

#### 4. 図面の簡単な説明

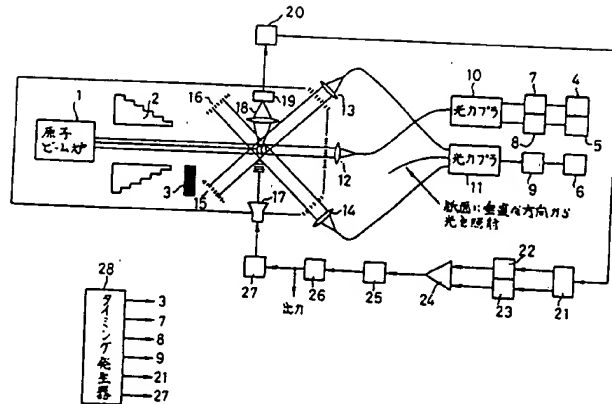
第1図は本発明実施例の構成を示すブロック図である。

- 1…原子ビーム炉、
- 2…ソレノイド、
- 3…シャッタ、
- 4…冷却用半導体レーザ、
- 5…ポンプ用半導体レーザ、
- 6…トラップ用半導体レーザ、
- 7〜9…光スイッチ、
- 10〜11…光カプラ、
- 12〜14…コリメータレンズ、
- 15〜18…反射鏡、
- 17…マイクログ波放射器、
- 18…蛍光集光用レンズ、
- 19…フォトダイオード、
- 20…前置増幅器、
- 21…切替器、
- 22〜23…メモリ、

- 24…差動増幅器、  
 25…積分増幅器、  
 26…周波数可変ルビジウム原子発振器、  
 27…シンセサイザ、  
 28…タイミング発生器。

特許出願人 日本電信電話株式会社

代理人 弁理士 谷 義 一



- 2: ソレノイド  
 3: シャッター  
 4: 冷却用半導体レーザー  
 5: ポンプ用半導体レーザー  
 6: トラップ用半導体レーザー  
 7-9: 光スイッチ  
 12-14: コリメータレンズ  
 15-16: 反射鏡  
 17: マイクロ波材料器  
 18: 受光素子用レンズ  
 19: フォトダイオード  
 20: 前置増幅器  
 21: 切替器  
 22-23: メモリ  
 24: 差動増幅器  
 25: 積分増幅器  
 26: 周波数可変ルビジウム原子発振器  
 27: シンセサイザ

本発明実施例の構成を示すブロック図  
 第1図

JPAB

CLIPPEDIMAGE= JP403101419A  
PAT-NO: JP403101419A  
DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 03101419 A  
TITLE: OPTICAL TRAP SYSTEM ATOMIC OSCILLATOR  
PUBN-DATE: April 26, 1991  
INVENTOR-INFORMATION:  
NAME  
KUDOME, KENJI  
KIHARA, MASAMI  
ASSIGNEE-INFORMATION:  
NAME COUNTRY  
NIPPON TELEGR & TELEPH CORP <NTT> N/A  
APPL-NO: JP01237129  
APPL-DATE: September 14, 1989  
INT-CL\_(IPC): H03L007/26; H01S001/00  
US-CL-CURRENT: 331/3

ABSTRACT:

PURPOSE: To realize a small sized atomic oscillator with excellent frequency precision by using atoms being optically trapped by a laser beam.

CONSTITUTION: After an atomic beam radiating in vacuum from an atomic beam furnace 1 is cooled and subject to single energy state change, an electron beam is trapped by the output light of a trap laser 6. Then a frequency of an electromagnetic wave generated by a frequency variable electromagnetic wave generating means 26 is shifted to opposite side by a prescribed frequency shift and the resulting wave radiates the trapped atomic beam and the frequency of the frequency variable electromagnetic wave generating means 26 is controlled so that the difference between the resonance transition of the atom beam induced by the electromagnetic wave and the resonance output detected by a resonance detection means 19 is decreased. Thus, a small sized atomic oscillator with excellent frequency precision is realized.

COPYRIGHT: (C)1991,JPO&Japio